胱氨酸类硒源对产蛋鸡蛋品质、抗氧化能力和蛋中硒含量的影响

龙　烁　张海军*　武书庚*　王晓翠　王　晶　齐广海

（中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点开放实验室，生物饲料开发国家工程研究中心，北京 100081）

摘　要：本试验旨在研究饲粮中添加硒代胱氨酸（SeC）、*L*-硒甲基硒代半胱氨酸（*L*-MSC）、*L*-硒代半胱氨酸（*L*-SeCys）和亚硒酸钠（SS）对产蛋鸡生产性能、蛋品质、抗氧化能力和蛋中硒含量的影响，以期为富硒鸡蛋的生产提供依据。选用26周龄体况良好、产蛋率接近的海兰灰蛋鸡450只，随机分为5个组，每组6个重复，每个重复15只鸡。对照组饲喂基础饲粮（不额外补充硒），其他4组饲粮在基础饲粮中添加0.30 mg/kg硒，分别来自SeC、*L*-MSC、*L*-SeCys和SS，各组饲粮中硒含量实测值分别为0.08、0.36、0.35、0.31和0.37 mg/kg。预试期1周，正试期4周。结果表明：1）与SS组和对照组相比，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的平均蛋重、产蛋率和料蛋比均无显著差异（$P>0.05$）。*L*-SeCys组平均日采食量在试验1~2周时显著低于对照组（$P<0.05$）。2）与SS组和对照组相比，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的蛋白高度、哈氏单位、蛋壳强度、蛋形指数、蛋黄和蛋白比例均无显著差异（$P>0.05$）。试验第4周末，SS组蛋黄颜色显著高于其他各组（$P<0.05$）；SeC和SS组蛋壳厚度显著高于其他各组（$P<0.05$），*L*-MSC和*L*-SeCys组蛋壳厚度显著高于对照组（$P<0.05$）；对照组蛋壳比例显著低于各试验组（$P<0.05$）。3）与SS组和对照组相比，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的血浆谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性显著升高（$P<0.05$）；SeC和SS组血浆总超氧化物歧化酶（T-SOD）活性显著高于对照组（$P<0.05$）；胱氨酸类硒源各组血浆丙二醛（MDA）含量与SS组相比无显著差异（$P>0.05$）；对照组血浆总抗氧化能力（T-AOC）显著低于其他各组（$P<0.05$），*L*-MSC组的血浆T-AOC最高，显著高于SS组（$P<0.05$）。4）与对照组相比，饲粮中添加胱氨酸类硒源显著提高了蛋中硒含量（$P<0.05$），其中*L*-MSC组最高；胱氨酸类硒源各组蛋中硒含量和硒转化率均高于SS组（$P>0.05$）。由此可见，饲粮中添加3种胱氨酸类硒源可增强机体抗氧化水平，

收稿日期：2016-11-18

基金项目：现代农业产业技术体系（CARS-41-K13）；家禽产业技术体系北京市创新团队（CARS-PSTP）

作者简介：龙　烁（1993–），女，山东临沂人，硕士研究生，从事家禽营养与饲料科学研究。E-mail: maplega@163.com

*通信作者：张海军，副研究员，硕士生导师，E-mail: fowlfeed@163.com；武书庚，研究员，硕士生导师，E-mail: wushugeng@caas.cn

提高蛋中硒含量，其中SeC和*L*-MSC效果更好。

关键词：蛋鸡；硒源；抗氧化能力；蛋中硒含量

中图分类号：S831.5

硒是动物机体的必需微量元素，作为谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase，GSH-Px）活性中心的组成成分，硒可以调节体内的氧化还原状态，在机体抗氧化方面也有至关重要的作用[1]。硒还能维持公禽的精液质量，有利于生育繁殖，可维持发育中胚胎的抗氧化系统[2]，且有抗癌作用[3]。硒在生物体内主要以有机硒的形式存在，主要为含硒氨基酸和蛋白质。其中，硒代氨基酸包括硒代胱氨酸（selenocystine，SeC）和硒代蛋氨酸(selenomethionine，SeMet)等。随着对硒研究的不断深入，人们逐渐意识到通过饮食摄入适量的硒对维持身体健康具有重要的意义，因此富硒鸡蛋受到越来越广泛的关注。国内的补硒剂包括有机硒和以亚硒酸钠（sodium selenite，SS）为主的无机硒化合物。SS的利用率和安全系数较低，有些国家已经限制SS作为硒营养补充剂的应用。与无机硒相比，有机硒更易在机体组织器官中存留[2]。作为硒代氨基酸，SeC是一种选择性高、毒性低的抗肿瘤药物，能诱导人类乳腺癌细胞凋亡[4]。硒代半胱氨酸（selencysteine，SeCys）可能是人体的第21种必需氨基酸[5]，*L*-硒代半胱氨酸（*L*-selencysteine，*L*-SeCys）是SeCys的左旋结构。*L*-硒甲基硒代半胱氨酸（*L*-Se-methylselenocysteine，*L*-MSC）是SeCys的甲基化衍生物，为甲基硒的重要前体物质，已被卫生部批准为新型营养强化剂(食品添加剂新品种2009年第9号公告)，作为第3代补硒营养强化剂和广谱抗癌剂，其应用前景广阔[6]。缺硒会引发健康问题，硒过量也会对机体产生不良影响，我国饲料添加剂安全使用规范（农业部公告第1224号）和欧洲管理执行委员会(commission implementing regulation No.427/2013)[7]均推荐家禽配合饲料中硒的最高限量为0.5 mg/kg。研究表明，蛋中硒含量在饲喂含硒饲粮第4～21天内增加[8-9]，饲粮中添加0.3 mg/kg的酵母硒（YSe）和SS对生产性能影响不显著，但显著增加蛋中硒含量[10-12]。目前关于比较SeC、*L*-MSC、*L*-SeCys等有机硒与SS对蛋鸡生产性能和蛋中硒含量影响的研究较少。鉴此，本研究旨在比较饲粮中添加相同剂量的SeC、*L*-MSC、*L*-SeCys和SS对产蛋鸡生产性能、蛋品质、抗氧化能力、蛋中硒含量和硒转化率的影响，以期为开发新硒源和生产富硒鸡蛋提供理论依据。

1　材料与方法

1.1 试验材料与试验动物

试验用硒源见表 1。试验动物为 26 周龄体况良好、产蛋率接近的海兰灰蛋鸡。

表 1 试验用硒源

Table 1 Selenium sources used in the experiment

硒源 Selenium sources	性状 Character	硒含量 Selenium content	来源 Source
亚硒酸钠 SS	白色粉末	45.6%	黄骅市津骅添加剂有限公司
硒代胱氨酸 SeC	淡黄色粉末	42.6%	重庆张邦医药科技有限公司
L-硒甲基硒代半胱氨酸 *L*-MSC	淡黄色固体	41.7%	济源希健生物医药科技发展有限公司
L-硒代半胱氨酸 *L*-SeCys	黄色至淡黄色固体	46.2%	重庆张邦医药科技有限公司

1.2 试验饲粮与饲养管理

参照《鸡饲养标准》（NY/T 33—2004）配制基础饲粮，基础饲粮组成及营养水平见表 2。试验鸡采用 4 层立体笼养，每笼 3 只，采用随机编号安排组位，避免环境和位置的影响。自由采食和饮水，自然光照加人工补光（16 h/d），相对湿度 50%~60%，自然通风结合纵向负压通风；每天清粪 2 次，每周消毒 1 次，常规免疫。预试期 1 周，正试期 4 周。

表 2 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 2 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米 Corn	61.22
豆粕 Soybean meal	27.70
豆油 Soybean oil	0.60
石粉 Limestone	8.70
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.00
食盐 NaCl	0.30
DL-蛋氨酸 *DL*-methionine （98%）	0.11
维生素矿物质预混料 Vitamin and mineral premix[1)]	0.32

植酸酶 Phytase （5 000 U/g）	0.05
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]	
代谢能 ME/(MJ/kg)	11.09
粗蛋白质 CP	16.70
钙 Ca	3.35
有效磷 AP	0.50
赖氨酸 Lys	0.82
蛋氨酸 Met	0.38
总含硫氨基酸 Total SAA	0.69
苏氨酸 Thr	0.64
色氨酸 Trp	0.19

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 Premix provided the following per kg of the diet: VA 12 500 IU，VD_3 4 125 IU，VE 15 IU，VK 2 mg，硫胺素 thiamine 1 mg，核黄素 riboflavin 8.5 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 50 mg，烟酸 niacin 32.5 mg，吡哆醇 pyridoxine 8 mg，生物素 biotin 2 mg，二氢叶酸 folic acid 5 mg，VB_{12} 5 mg，胆碱 choline 500 mg，Mn 65 mg，I 1 mg，Fe 60 mg，Cu 8 mg，Zn 66 mg。

[2)] 代谢能和有效磷为计算值，其余均为实测值。ME and AP were calculated values, while the others were measured values.

1.3 试验设计

试验选用 26 周龄体况良好、产蛋率接近的海兰灰蛋鸡 450 只，随机分为 5 组，每组 6 个重复，每个重复 15 只鸡。对照组饲喂基础饲粮（不额外补充硒），SeC、*L*-MSC、*L*-SeCys 和 SS 组饲粮分别在基础饲粮中添加 0.30 mg/kg 硒，饲粮中硒含量实测值分别为 0.08、0.36、0.35、0.31 和 0.37 mg/kg。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生产性能

每天 09:30 收蛋，以重复为单位记录蛋重、产蛋数、软破蛋及异形蛋数。计算平均蛋重

和产蛋率。每周定时结料、称重，以重复为单位计算平均日采食量和料蛋比。

平均蛋重(g)=总产蛋量/鸡蛋总数；

产蛋率(%)=100×总产蛋数/(鸡只数×天数)；

平均日采食量［g/(只 d)］=总采食量/(鸡只数×天数)；

料蛋比=总耗料量/总蛋重。

1.4.2　蛋品质

试验第2和4周末，每重复随机取3枚蛋，测定蛋品质。采用SONOVA蛋品质自动分析仪（Egg Analyzer™，Orka Technology Ltd.）测定蛋重、浓蛋白高度、哈氏单位和蛋黄颜色；蛋壳强度分析仪（Egg Force Reader，Orka Technology Ltd.）测定蛋壳强度；蛋壳厚度测定仪（Eggshell Thickness Gauge，Orka Technology Ltd.）测定蛋壳厚度；蛋形指数测定仪（Egg Index Reader，Fujibira Industry Co., Ltd.）测量蛋形指数。蛋成分分析：全蛋、蛋壳、蛋黄和蛋清分别称重，并统计蛋壳、蛋白和蛋黄比例。

1.4.3　血浆抗氧化指标

试验第4周末，每重复随机取2只鸡，空腹翅静脉采集抗凝血，4 000 r/min、4 ℃离心10 min制备血浆，分装，–20 ℃保存。比色法测定血浆GSH-Px活性和总抗氧化能力（T-AOC），黄嘌呤氧化酶法测定血浆总超氧化物歧化酶（T-SOD）活性，硫代巴比妥酸法测定血浆丙二醛（MDA）含量。采用南京建成生物工程研究所试剂盒，严格按照试剂盒说明书操作。

1.4.4　蛋中硒含量

利用氢化物–原子荧光光谱法（GB 5009.93—2010）测定全蛋液中硒含量。于试验第4周末，每重复随机取2枚蛋，去壳，蛋液混匀，冻干。电热板加热消解：称冻干全蛋粉2 g，置消化瓶，加入10.0 mL混合酸（硝酸与高氯酸体积比为9：1），放几粒玻璃珠，加盖表面皿，静置过夜，电热板加热，期间及时补加硝酸溶液，溶液变为清亮无色，且有白烟时，继续加热至剩余2 mL，冷却，加入5.0 mL盐酸，继续加热至溶液变为清亮无色并伴有白烟，此时将六价硒还原为四价。冷却，转移至50 mL容量瓶，定溶，混匀备用。取10.0 mL消化液，于15 mL离心管，加盐酸（6 mol/L）2.0 mL、铁氰化钾(100 g/L)1.0 mL，混匀。利用原子荧光光谱仪测定硒含量，同时设空白对照（超纯水）和标准样品对照（硒标准参照物GBW8551）。

1.4.5　蛋中硒转化率

根据料蛋比，计算蛋中硒转化率：

蛋中硒转化率（%）=100×（1 kg鸡蛋硒含量/生产1 kg鸡蛋所摄入的总硒含量）。

1.5 数据处理

采用SPSS 19.0进行单因素方差分析（one-way ANOVA），采用Duncan氏法进行多重比较，以P<0.05作为显著性标准，以P<0.01作为极显著性标准，结果以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 胱氨酸类硒源对产蛋鸡生产性能的影响

由表 3 可知，与 SS 组和对照组相比，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的平均蛋重、产蛋率和料蛋比均无显著差异（P>0.05）；*L*-SeCys 组平均日采食量在试验 1~2 周时显著低于对照组（P<0.05），其余各组平均日采食量无显著差异（P>0.05）。饲粮中添加相同水平的不同硒源，胱氨酸类硒源在一定程度上降低了产蛋鸡的平均日采食量，而对产蛋率、平均蛋重和料蛋比均无显著影响。

表 3 饲粮中添加胱氨酸类硒源对产蛋鸡生产性能的影响

Table 3 Effects of dietary cystine selenium sources on production performance of laying hens

项目 Items	时间 Time/周	组别 Groups					SEM	*P* 值 *P*-value
		对照 Control	硒代胱氨酸 SeC	*L*-硒甲基硒代半胱氨酸 *L*-MSC	*L*-硒代半胱氨酸 *L*-SeCys	亚硒酸钠 SS		
产蛋率 Laying rate/%	1~2	80.33±3.54	79.86±7.07	81.33±6.40	81.27±7.40	83.70±6.33	1.320	0.419
	3~4	84.11±3.31	86.83±3.17	83.80±5.04	84.76±4.28	84.21±4.41	0.800	0.892
	1~4	83.51±3.90	81.43±4.53	82.62±3.75	83.73±5.64	83.01±5.59	0.850	0.961
平均蛋重 Average egg weight/g	1~2	61.16±1.18	61.14±0.13	59.41±0.59	60.49±1.13	60.82±1.30	0.230	0.124
	3~4	61.79±0.46	62.26±0.22	61.21±0.71	61.93±0.86	61.24±0.89	0.150	0.137
	1~4	61.19±0.41	61.72±0.16	60.36±0.67	61.23±1.01	61.03±1.06	0.170	0.211
平均日采食量 ADFI/g	1~2	111.34±4.74^{a}	109.50±2.39^{ab}	105.61±3.79^{ab}	104.30±6.13^{b}	107.30±3.92^{ab}	0.970	0.129
	3~4	118.87±5.07	117.33±2.82	114.39±9.27	117.22±4.54	115.16±2.92	1.030	0.656

	1~4	115.10±4.22	113.41±1.68	109.99±6.23	110.78±5.29	111.71±2.60	0.860	0.341
料蛋比 Feed/egg	1~2	2.10±0.04	2.28±0.25	2.32±0.12	2.12±0.12	2.06±0.14	0.030	0.127
	3~4	2.35±0.14	2.28±0.22	2.29±0.93	2.24±0.76	2.32±0.17	0.030	0.827
	1~4	2.24±0.10	2.28±0.16	2.29±0.07	2.24±0.14	2.23±0.16	0.030	0.962

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），相同或无字母表示差异不显著（$P>0.05$）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$). The same as blow.

2.2 胱氨酸类硒源对产蛋鸡蛋品质的影响

由表 4 可知，与 SS 组和对照组相比，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的蛋白高度、哈氏单位、蛋壳强度、蛋形指数、蛋黄和蛋白比例均无显著差异（$P>0.05$），但胱氨酸类硒源各组第 4 周末的哈氏单位均高于 SS 组，且各试验组的蛋白高度均高于对照组。试验第 4 周末，SS 组蛋黄颜色显著高于其他各组（$P<0.05$）；SeC 和 SS 组蛋壳厚度显著高于其他各组（$P<0.05$），*L*-MSC 和 *L*-SeCys 组蛋壳厚度显著高于对照组（$P<0.05$）；对照组的蛋壳比例显著低于各试验组（$P<0.05$）。结果表明，蛋鸡饲粮中补充适量硒能提高蛋黄颜色，增加蛋壳厚度和蛋壳比例，在一定程度上提高蛋白高度和哈氏单位。

表4　饲粮中添加胱氨酸类硒源对产蛋鸡蛋品质的影响

Table 4　Effects of dietary cystine selenium sources on egg quality of laying hens

项目 Items	时间 Time/week	组别 Groups					SEM	*P* 值 *P*-value
		对照 Control	硒代胱氨酸 SeC	*L*-硒甲基硒代半胱氨酸 *L*-MSC	*L*-硒代半胱氨酸 *L*-SeCys	亚硒酸钠 SS		
蛋白高度 Albumen height/mm	2	5.59±2.13	6.18±0.46	5.73±0.30	6.15±0.62	6.37±0.35	0.240	0.842
	4	6.46±0.36	6.73±1.08	6.57±0.67	6.82±0.62	6.60±0.40	0.150	0.188
哈氏单位	2	77.83±3.35	77.41±4.00	71.37±7.65	73.27±9.78	78.53±2.17	1.270	0.334

Haugh unit	4	79.10±2.02	80.56±8.44	80.18±5.02	81.68±3.41	79.73±3.14	1.050	0.242
蛋黄颜色	2	4.72±0.25	4.99±0.19	4.92±0.16	4.75±0.31	5.08±0.41	0.060	0.111
Yolk color	4	5.06±0.49^{b}	5.30±0.61^{b}	5.25±0.32^{b}	5.08±0.17^{b}	6.08±0.50^{a}	0.130	0.006
蛋壳强度	2	36.57±5.14	36.07±1.56	35.48±2.41	37.86±3.19	39.56±3.46	0.760	0.532
Eggshell strength/（N/m^2）	4	39.78±3.15	39.71±5.62	40.29±2.57	39.24±2.58	39.30±2.01	0.920	0.337
蛋壳厚度	2	0.43±0.02	0.43±0.01	0.42±0.01	0.43±0.01	0.45±0.02	0.003	0.197
Eggshell thickness/mm	4	0.34±0.01^{c}	0.43±0.02^{a}	0.40±0.02^{b}	0.38±0.02^{b}	0.43±0.02^{a}	0.008	<0.01
蛋形指数	2	1.31±0.02	1.33±0.01	1.32±0.02	1.32±0.01	1.34±0.01	0.004	0.812
Egg shape index	4	1.33±0.01	1.32±0.00	1.33±0.02	1.34±0.03	1.33±0.01	0.004	0.836
蛋壳比例	2	9.34±0.57^{b}	10.08±0.27^{a}	10.63±0.21^{a}	10.54±0.49^{a}	10.46±0.17^{a}	0.140	<0.01
Egg shell percentage/%	4	9.50±0.30	9.57±0.21	9.93±0.41	9.79±0.16	9.74±0.21	0.065	0.207
蛋黄比例	2	26.27±0.76	26.27±0.82	26.83±0.87	25.63±1.18	25.90±1.33	0.210	0.519
Yolk percentage/%	4	26.49±0.93	25.19±1.49	25.86±0.71	25.36±0.86	26.38±1.48	0.270	0.333
蛋白比例	2	64.38±0.80	64.43±4.22	62.63±0.79	62.65±2.29	62.59±2.22	0.480	0.529
Albumen percentage/%	4	63.39±1.47	65.29±1.39	64.21±0.73	64.85±0.73	63.87±1.65	0.290	0.209

2.3 胱氨酸类硒源对产蛋鸡血浆抗氧化指标的影响

由表5可知，与SS组和对照组相比，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的血浆GSH-Px活性显著升高（P<0.05），SeC、*L*-SeCys和*L*-MSC组的血浆GSH-Px活性分别比SS组提高了141.42%、83.59%和117.33%。胱氨酸类硒源各组的血浆T-SOD活性与SS组相比无显著差异（P>0.05），SeC和SS组血浆T-SOD活性显著高于对照组（P<0.05），*L*-SeCys和*L*-MSC组血浆T-SOD活性也高于

对照组（P>0.05）。胱氨酸类硒源各组的血浆MDA含量与SS组相比无显著差异（P>0.05）。对照组血浆T-AOC显著低于其他各组（P<0.05），*L*-MSC组的血浆T-AOC最高，显著高于SS组（P<0.05）。结果表明，饲粮中添加硒源能提高产蛋鸡的机体抗氧化水平。

表 5　饲粮中添加胱氨酸类硒源对产蛋鸡血浆抗氧化指标的影响

Table 5　Effects of dietary cystine selenium sources on plasma antioxidant indexes of laying hens

项目 Items	组别 Groups					SEM	*P* 值 *P*-value
	对照 Control	硒代胱氨酸 SeC	*L*-硒甲基硒代半胱氨酸 *L*-MSC	*L*-硒代半胱氨酸 *L*-SeCys	亚硒酸钠 SS		
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mL)	1 038.00±260.88[c]	2 582.92±199.30[a]	1 964.20±437.61[b]	2 325.20±213.86[ab]	1 069.90±125.45[c]	170.920	<0.010
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mL)	140.32±18.63[b]	214.30±54.88[a]	179.29±28.81[ab]	174.00±1.41[ab]	216.42±0.71[a]	10.170	0.021
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	2.95±0.67[c]	5.09±0.99[ab]	6.80±0.87[a]	6.29±1.90[ab]	4.99±1.60[b]	0.360	<0.010
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	10.75±1.61	9.26±1.37	8.36±1.59	8.76±1.54	8.08±0.97	0.370	0.054

2.4　胱氨酸类硒源对产蛋鸡蛋中硒含量和硒转化率的影响

由表6可知，与对照组相比，饲粮中添加胱氨酸类硒源显著提高了蛋中硒含量（P<0.05），其中*L*-MSC组最高；与SS组相比，SeC、*L*-MSC和*L*-SeCys组蛋中硒含量分别提高了12.00%、27.90%和4.63%（P>0.05）。硒源对蛋中硒转化率有一定的影响，4种硒源蛋中硒转化率顺序为：*L*-MSC>*L*-SeCys>SeC>SS；胱氨酸类硒源各组蛋中硒转化率均高于SS组（P>0.05）。

表6　饲粮中添加胱氨酸类硒源对产蛋鸡蛋中硒含量和硒转化率的影响

Table 6　Effects of dietary cystine selenium sources on selenium content and selenium conversion rate in egg of laying hens

项目 Items	对照 Control	硒代胱氨酸 SeC	*L*-硒甲基硒代半胱氨酸 *L*-MSC	*L*-硒代半胱氨酸 *L*-SeCys	亚硒酸钠 SS	SEM	*P* 值 *P*-value
	组别 Groups						
蛋中硒含量 Egg selenium content/(μg/kg)	121.10±65.82[b]	200.70±26.29[a]	229.20±20.69[a]	187.50±32.63[a]	179.20±26.19[b]	11.630	0.011
蛋中硒转化率 Egg selenium conversion rate/%	46.27±7.71[a]	23.41±2.01[b]	27.83±2.32[b]	26.94±4.64[b]	21.51±2.94[b]	2.310	<0.010

3 讨 论

3.1 胱氨酸类硒源对产蛋鸡生产性能的影响

硒是人和动物机体必需的微量元素之一，缺硒会引发克山病、骨节病和地氟病等疾病，硒还具有抗氧化、抗应激、提高免疫力和抗癌等功能[12]。本试验表明，与 SS 组相比，饲粮中添加 0.3 mg/kg 胱氨酸类硒源对产蛋鸡的生产性能无显著影响。研究表明，饲粮中添加 0.3 mg/kg 的 SeMet、YSe 和 SS 对蛋鸡的生产性能无显著影响，0.1、0.3 和 0.5 mg/kg 的 SeMet 对蛋鸡的生产性能也无显著影响[8]；有机硒或无机硒对蛋鸡的生产性能也无显著影响[10-11,13]；富硒益生菌能显著增加蛋鸡的产蛋率和平均蛋重，降低料蛋比，这与益生菌直接相关[14]。蛋鸡的生产性能和对硒元素的敏感性受饲粮和蛋鸡的品种、日龄及机体代谢情况等因素的影响，所以饲粮中添加不同来源和水平的硒对生产性能的影响有别[15]。本试验选用了开产到高峰期过度的海兰灰蛋鸡，鸡体内的代谢和抗氧化能力均处于旺盛时期，生产性能受外界饲粮因素的影响较小；试验 1~2 周，*L*-SeCys 组的平均日采食量显著低于对照组，但与 SS 组相比无显著差异，可能是因为试验初期蛋鸡未适应饲粮中添加的硒源；随着饲喂时间的延长，各组的平均日采食量无显著差异，产蛋率和平均蛋重均在增加，与 SS 相比，0.3 mg/kg 的 SeC、*L*-MSC、*L*-SeCys 对蛋鸡生产性能的改善作用更强。

3.2 胱氨酸类硒源对产蛋鸡蛋品质的影响

蛋鸡品种、产蛋日龄、营养水平和疾病等均影响蛋品质。蛋白高度和哈氏单位是衡量鸡蛋蛋白质量和新鲜度的重要指标[14]。研究表明，饲粮中添加0.3 mg/kg硒，YSe组蛋鸡的哈氏单位高于SS组，但差异不显著[11]。本试验研究表明，胱氨酸类硒源各组第4周末产蛋鸡的哈氏单位均高于SS组，且各试验组的蛋白高度均高于对照组，说明胱氨酸类硒源有提高哈氏单位的趋势。孙庆艳等[15]研究表明，饲粮添加不同来源和水平的硒，对常规蛋品质均无显著影响，但与对照组相比，添加硒组的蛋壳厚度略有增加，蛋黄颜色均有加深。本试验研究表明，饲粮中添加0.3 mg/kg的胱氨酸类硒源和SS对产蛋鸡的蛋形指数和蛋壳强度均无显著影响；试验第4周，SeC和SS组蛋壳厚度相同，显著高于其他各组，*L*-MSC和*L*-SeCys组蛋壳厚度显著低于SS组，对照组的蛋壳厚度显著低于各试验组。研究表明，YSe能够增加蛋壳厚度，但无显著差异[14]，说明硒能改善鸡蛋的蛋壳品质，可能是通过提高抗氧化能力来保护蛋壳[15]，SeC和SS对蛋壳厚度的作用效果优于*L*-MSC和*L*-SeCys。

3.3 胱氨酸类硒源对产蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

机体的健康程度与其抗氧化能力密不可分。硒是GSH-Px活性中心的必需组成成分，还可通过其他含硒酶或硒蛋白质调节机体的抗氧化能力，通过清除体内自由基而发挥抗氧化损伤作用，可防止大分子发生氧化应激反应[16]，在机体抗氧化防御系统中发挥着重要的作用。研究表明，0.3 mg/kg的SeMet可显著提高全血中硒含量和GSH-Px活性[5]，0.3 mg/kg的SeMet、YSe和SS均显著提高了血浆GSH-Px和T-SOD活性[8]。本研究表明，与SS组和对照组相比，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的血浆GSH-Px活性显著升高。研究表明，血液中硒含量与血浆T-SOD活性有密切关系，T-SOD活性可以相对反映出硒在体内清除自由基的程度，GSH-Px活性升高可减少过氧化物对T-SOD的损害[17]。GSH-Px和T-SOD是机体抗氧化系统的重要抗氧化酶，T-SOD能够将免疫反应中产生的超氧自由基(O_2^-)转化为过氧化氢（H_2O_2），再通过GSH-Px和过氧化氢酶（CAT）作用转化为H_2O和O_2，从而提高机体的抗氧化能力。本试验研究表明，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的血浆T-SOD活性与SS组相比无显著差异，但SeC和SS组血浆T-SOD活性显著高于对照组。研究表明，0.2、0.5和1.0 mg/kg的YSe和SS均能显著提高蛋鸡全血T-SOD活性[14]。

T-AOC是衡量机体抗氧化能力的综合指标[15]，食用有机硒能极显著提高肝脏的T-AOC[18]。本试验结果表明，胱氨酸类硒源各组产蛋鸡的血浆T-AOC均高于SS组，其中

L-MSC组的血浆T-AOC最高，显著高于SS组；与对照组相比，饲粮中添加不同硒源均显著提高了血浆T-AOC。有机硒提高T-AOC，主要与GSH-Px活性的提高有关，有机硒中的硒比SS更容易构成GSH-Px的活性中心[18]。

MDA是机体脂质过氧化的产物，随着体内氧自由基的活性增强，氧化作用增强，MDA含量升高，抗氧化作用减弱。研究表明，YSe可极显著降低血清MDA含量[15,19]，显著降低肝脏MDA含量，提高肉鸡血浆GSH-Px活性，极显著提高肝脏T-AOC[18]。本试验结果表明，胱氨酸类硒源各组的血浆MDA含量与SS组相比无显著差异；与对照组相比，饲粮中添加不同硒源均降低了血浆MDA含量。因为饲粮中添加一定量硒元素能提高GSH-Px和T-SOD的活性，后者能抑制MDA的产生，从而减少过多自由基对机体的伤害[19]。血液中硒含量与饲粮中硒水平呈显著线性关系(R^2=0.968，$P<0.001$)[7]。

3.4　胱氨酸类硒源对产蛋鸡蛋中硒含量和硒转化率的影响

硒是人体必需的微量元素之一，主要源于食物。鸡蛋是人类膳食的重要组成部分，故可通过提高鸡蛋中硒含量来达到补充硒的目的。研究表明，鸡蛋中硒含量与饲粮中硒水平呈线性关系[10,14,20]。饲喂含硒饲粮后，蛋中硒元素在 2 d 后开始沉积，7 d 达到高峰[21]；更换饲粮 4 周后，蛋中硒含量下降到正常水平[22]。白来航蛋鸡饲粮中添加 0.3 mg/kg 的不同硒源均能显著提高蛋中硒含量[4]。研究表明，饲粮中添加相同水平(0.3 mg/kg)的 4 种硒源均能显著提高蛋中硒的沉积量[15]，提高第 4 和 8 周末蛋中硒含量[13]。饲粮中添加 0~0.5 mg/kg 硒，蛋中硒含量呈线性增加[7]。本研究表明，与 SS 组相比，饲粮中添加 0.3 mg/kg 的 SeC、*L*-MSC 和 *L*-SeCys 均提高了蛋中硒含量，其中，*L*-MSC 组的蛋中硒含量最高；与对照组相比，饲粮中添加胱氨酸类硒源均提高了蛋中硒含量。前人研究表明，饲粮中添加相同水平的不同硒源，有机硒组蛋中硒含量显著高于无机硒组[11,13]。

富硒蛋中硒含量为 200~500 μg/kg（DB36/T 566—2009、DB6124.01—2010），本试验 SeC、*L*-MSC、*L*-SeCys、SS 组蛋中硒含量分别为 200.70、229.20、187.50 和 179.20 μg/kg，均达到或接近富硒蛋标准。关于硒摄入的每日推荐量，不同地区的规定有别。我国《营养素补充剂申报与审评规定(试行)》中规定，硒的摄取量最低为 15 μg/d；国际学术组织联合会（FAO/WHO/IAEA）规定男女成人膳食中硒最低需要量分别为 21 和 16 μg/d，建议膳食中硒最适生理需要量为 41 μg/d[23]；美国科学院食物及营养组提出美国男女成人每日膳食中硒

供给量分别为70及55 μg/d[24]。每天食用2～3枚*L*-MSC组鸡蛋即能满足机体对硒的需要量。

有研究指出，硒在小肠中被吸收，有机硒可主动穿过肠壁，生物利用率高，无机硒只能通过被动扩散进入肠壁[3]，故有机硒的沉积效果远优于无机硒[7,10]，所以本试验中有机硒各组的蛋中硒转化率高于SS组，与前人的研究结果一致[12,14-15]。本研究结果也表明，各试验组蛋中硒转化率均显著低于对照组，这与胡华锋等[25]研究结果相一致。硒供应不足时，家禽会动员体内储存的硒来维持健康[26]，满足部分需要；家禽也会更好地利用摄入的有限的硒源维持蛋中硒含量，故对照组蛋中硒转化率最高。

本研究表明，*L*-MSC和SeC作为饲粮中硒源补充剂能够显著提高产蛋鸡蛋中硒含量，具有实践应用性。*L*-MSC具有抗氧化、抗衰老、治疗心脑血管疾病和解重金属毒等作用[4]，还是一种有效的细胞增长抑制剂，能有效抑制肿瘤细胞的增殖并诱导其凋亡，能抑制多种癌基因的表达[27]。2002年，*L*-MSC被美国食品药品监督管理局（FDA）认定为最新一代硒源类饮食补充剂，2009年被我国批准为新型食品营养强化剂。所以富含*L*-MSC的鸡蛋不仅可以增强机体的抗氧化能力，也具有一定的防癌功效。

4 结 论

① 与SS相比，饲粮中添加0.3 mg/kg的SeC、*L*-MSC、*L*-SeCys，未见显著影响海兰灰蛋鸡的生产性能和除蛋壳厚度、蛋黄颜色以外的蛋品质指标。

② 与SS相比，3种胱氨酸类硒源均可提高产蛋鸡的血浆GSH-Px活性和T-AOC，显著增强机体抗氧化水平，其中SeC和*L*-MSC效果更好。

③ 3种胱氨酸类硒源均能提高蛋中硒含量，*L*-MSC在蛋中沉积效果更好。

参考文献：

[1] LI F,LUTZ P B,PEPELYAYEVA Y,et al.Redox active motifs in selenoproteins[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2014,111(19):6976–6981.

[2] SURAI P F,FISININ V I.Selenium in poultry breeder nutrition:an update[J].Animal Feed Science and Technology,2014,191:1–15.

[3] BROZMANOVÁ J,MÁNIKOVÁ D,VLČKOVÁ V,et al.Selenium:a double-edged sword for defense and offence in cancer[J].Archives of Toxicology,2010,84(12):919–938.

[4] CHEN T F,WONG Y S.Selenocystine induces caspase-independent apoptosis in MCF-7 human breast carcinoma cells with involvement of p53 phosphorylation and reactive oxygen species generation[J].The International Journal of Biochemistry & Cell Biology,2009,41(3):666–676.

[5] SONG Y X,HOU J X,ZHANG L,et al.Effect of dietary selenomethionine supplementation on growth performance,tissue se concentration,and blood glutathione peroxidase activity in kid boer goats[J].Biological Trace Element Research,2015,167(2):242－250.

[6] 刘建群,赵元,张锐,等.新型营养强化剂*L*-硒甲基硒代半胱氨酸的研究进展[J].中国食品添加剂,2011(2):152–156.

[7] DELEZIE E,ROVERS M,VAN DER AA A,et al.Comparing responses to different selenium sources and dosages in laying hens[J].Poultry Science,2014,93(12):3083–3090.

[8] JING C L,DONG X F,WANG Z M,et al.Comparative study of *DL*-selenomethionine vs. sodium selenite and seleno-yeast on antioxidant activity and selenium status in laying hens[J].Poultry Science,2015,94(5):965–975.

[9] SKŘIVAN M, ŠIMÁNĚ J, DLOUHÁ G,et al.Effect of dietary sodium selenite,Se-enriched yeast and Se-enriched Chlorella on egg Se concentration,physical parameters of eggs and laying hen production[J].Czech Journal of Animal Science,2006,51(4):163–167.

[10] LEESON S,NAMKUNG H,CASTON L,et al.Comparison of selenium levels and sources and dietary fat quality in diets for broiler breeders and layer hens[J].Poultry Science,2008,87(12):2605–2612.

[11] PAYNE R L,LAVERGNE T K,SOUTHERN L.Effect of inorganic versus organic selenium on hen production and egg selenium concentration[J].Poultry Science,2005,84(2):232–237.

[12] RICHIE J P JR,DAS A,CALCAGNOTTO A M,et al.Comparative effects of two different forms of selenium on oxidative stress biomarkers in healthy men:a randomized clinical trial[J].Cancer Prevention Research,2014,7(8):796–804.

[13] UTTERBACK P L,PARSONS C M,YOON I,et al.Effect of supplementing selenium yeast in diets of laying hens on egg selenium content[J].Poultry Science,2005,84(12):1900–1901.

[14] PAN C L,ZHAO Y X,LIAO S F,et al.Effect of selenium-enriched probiotics on laying performance,egg quality,egg selenium content,and egg glutathione peroxidase activity[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2011,59(21):11424–11431.

[15] 孙庆艳,武书庚,张海军,等.饲粮中添加不同硒源对产蛋鸡生产性能和抗氧化能力的影响[J].动物营养学报,2016,28(4):1177–1185.

[16] URSINI F,HEIM S,KIESS M,et al.Dual function of the selenoprotein PHGPx during sperm maturation[J].Science,1999,285(5432):1393–1396.

[17] 瞿祥虎,黄开勋,高中洪,等.谷胱甘肽过氧化物酶的硒代半胱氨酸插入元件[J].中国生物化学与分子生物学学报,1999,15(2):274–278.

[18] 邱榕生,呙于明.有机镁与有机硒对肉鸡机体组织抗氧化机能的影响[J].畜牧兽医学报,2003,34(6):542–547.

[19] MOORE M A,WANDERA R C,XIA Y M,et al.Selenium supplementation of Chinese women with habitually low selenium intake increases plasma selenium,plasma glutathione peroxidase activity,and milk selenium,but not milk glutathione peroxidase activity[J].The Journal of Nutritional Biochemistry,2000,11(6):341–347.

[20] BENNETT D C,CHENG K M.Selenium enrichment of table eggs[J].Poultry Science,2010,89(10):2166–2172.

[21] HANTIRATIKUL A,CHINRASRI O, CHANTIRATIKUL P.Effect of sodium selenite and zinc-*L*-selenomethionine on performance and selenium concentrations in eggs of laying hens[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2008,21(7):1048–1052.

[22] ORT J F,LATSHAW J D.The toxic level of sodium selenite in the diet of laying chickens[J].Journal of Nutrition,1978,108(7):1114–1120.

[23] LEVANDER O A.Selenium requirements as discussed in the 1996 joint FAO/IAEA/WHO expert consultation on trace elements in human nutrition[J].Biomedical and Environmental Sciences,1997,10(2/3):214–219.

[24] National Research Council (US).Recommended dietary allowances[M].10th ed.Washington,D C: National Academy Press, 1989.

[25] 胡华锋,黄炎坤,介晓磊,等.3种硒源对蛋鸡生产性能、蛋硒含量及转化率的影响[J].动物营养学报,2013,25(7):1603–1609.

[26] OLIVEIRA T F B,RIVERA D F R,MESQUITA F R,et al.Effect of different sources and levels of selenium on performance,meat quality,and tissue characteristics of broilers[J].Journal of Applied Poultry Research,2014,23(1):15–22.

[27] UNNI E,KITTRELL F S,SINGH U,et al.*Osteopontin* is a potential target gene in mouse mammary cancer chemoprevention by Se-methylselenocysteine[J].Breast Cancer Research,2004,6(5):586–592.

Effects of Cystine Selenium Sources on Egg Quality, Antioxidant Capacity and Egg Selenium Content of Laying Hens

LONG Shuo ZHANG Haijun* WU Shugeng* WANG Xiaocui WANG Jing QI Gaunghai

（*Key Laboratory of Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture, National Engineering Research Center of Biological Feed, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing* 100081, *China*）

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of dietary selenocystine (SeC), *L*-Se-methyselenocysteine (*L*-MSC), *L*-selencysteine (*L*-SeCys) and sodium selenite (SS) on production performance, egg quality, antioxidant capacity and egg selenium content of laying hens, with the aim to provide basis for the production of selenium enriched eggs. Four hundred and fifty healthy Hy-Line Grey laying hens of 26-week-old with similar laying rate were randomly allotted into 5 groups with 6 replicates per group and 15 hens per replicate. The laying hens in control group were fed a basal diet without adding exogenous selenium source, and the other four groups were fed the basal diets supplemented with SeC, *L*-MSC, L-SeCys or SS containing 0.30 mg/kg selenium, respectively. The measured values of selenium content in diets were 0.08, 0.36, 0.35,

*Corresponding authors: ZHANG Haijun, associate professor, E-mail: fowlfeed@163.com; WU Shugeng, professor, E-mail: wushugeng@caas.cn (责任编辑 李慧英)

0.31 and 0.37 mg/kg, respectively. The pre-test period lasted for one week and the test period lasted for four weeks. The results showed as follows: 1）compared with SS and control groups, the average egg weight, laying rate and the ratio of feed to egg of laying hens in all cystine selenium sources groups had no significant differences ($P>0.05$). The average daily feed intake (ADFI) in *L*-SeCys group was significantly lower than that in control group during 1 to 2 weeks ($P<0.05$). 2) Compared with SS and control groups, the albumen height, Haugh unit, eggshell strength, egg shape index and the percentages of yolk and albumen of laying hens in all cystine selenium sources groups had no significant differences ($P>0.05$). At the end of 4th week, the yolk color in SS group was significantly higher than that in the other groups ($P<0.05$); the eggshell thickness in SeC and SS groups was significantly higher than that in the other groups ($P<0.05$), and the eggshell thickness in *L*-MSC and *L*-SeCys groups was significantly higher than that in control group ($P<0.05$); the egg shell percentage in control group was significantly lower than that in the other groups ($P<0.05$). 3) Compared with SS and control groups, the activity of glutathione peroxidase (GSH-Px) in plasma of laying hens in all cystine selenium sources groups was significantly increased ($P<0.05$). The activity of total superoxide dismutase activity (T-SOD) in plasma in SeC and SS groups was significantly higher than that in control group ($P<0.05$). There was no significant difference on the content of malondialdebyde (MDA) in plasma between all cystine selenium sources groups and SS group ($P>0.05$). The total antioxidant capacity (T-AOC) in plasma in control group was significantly lower than that in the other groups ($P<0.05$), and the T-AOC in *L*-MSC group was highest and was significantly higher than that in SS group ($P<0.05$). 4）Compared with control group, dietary cystine selenium sources significantly increased egg selenium content ($P<0.05$), and egg selenium content in *L*-MSC group was highest. The egg selenium content and selenium conversion rate in all cystine selenium sources groups were higher than that in SS group ($P>0.05$). In conclusion, dietary 3 cystine selenium sources can improve the antioxidant capacity and egg selenium content, and SeC and *L*-MSC have the better effects.

Key words: laying hens; selenium sources; antioxidant capacity; egg selenium content